

CÁLCULO DE LA POTENCIA DE ROTACIÓN Y POTENCIA MÁXIMA DISPONIBLE PARA UN AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL

Fuerzas que ejerce el viento sobre la pala

Supondremos que la fuerza que el viento confiere a las palas del aerogenerador para que éste mantenga su movimiento de rotación tiene dos orígenes diferentes: la fuerza de sustentación, que es de origen hidrodinámico y se puede justificar mediante la ley de Bernoulli; y la fuerza debida a la transferencia de momento del viento (es decir, a los choques moleculares entre las partículas de aire y la pala).

Fuerza de sustentación: La fuerza de sustentación está dada por la fórmula

$$F_{ms} = \frac{1}{2} \rho C_X A v^2 \quad (1)$$

En ésta, ρ es la densidad del aire, C_X es el coeficiente de sustentación, A es el área que opone cada pala al paso del viento y v es la velocidad del viento que incide en el rotor.

Fuerza debida a colisiones: Si v representa el módulo de la velocidad del viento antes de llegar a las palas y v_f es el módulo de la velocidad después de chocar con las palas, entonces se cumplirá

$$v_f = \alpha v \quad (2)$$

donde el coeficiente α , al que podemos denominar coeficiente de restitución, debe tener un valor entre 0 y 1 para garantizar la conservación de la energía. Además, de acuerdo con el dibujo mostrado, donde se aprecia cómo el viento choca con las palas con un ángulo de ataque θ , el momento transferido por el viento a la pala en la dirección vertical será igual a la componente vertical de la velocidad v_f .

Por lo tanto

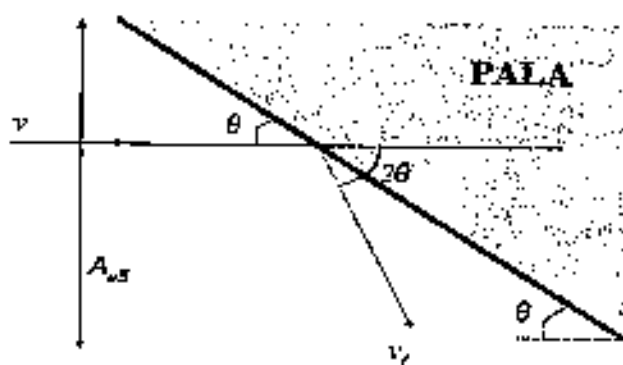
$$(\Delta p)_{\text{vertical}} = m (\Delta v)_{\text{vertical}} = m v_f \sin(2\theta) = m \alpha v \sin(2\theta) \quad (3)$$

donde p representa momento lineal y m es la masa del viento que colisiona con la pala. La masa, como es habitual en cálculos de energía eólica o similares, se expresa como

$$m = \rho V = \rho A_{eff} v \Delta t = \rho A \cos \theta v \Delta t \quad (4)$$

siendo Δt el tiempo que tarda el viento en atravesar la pala, y A_{eff} el área efectiva que encuentra el viento a su paso, tal y como se muestra en el dibujo. Finalmente, la fuerza transferida a la pala debida a la transferencia de momento tiene la forma, uniendo las expresiones anteriores,

$$F_{col} = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \alpha \sin(2\theta) \cos \theta \rho A v^2 \quad (5)$$



Potencia de rotación:

La potencia de un aerogenerador de 3 helices cuyo rotor gira a una velocidad angular ω viene dada por

$$P_{rot} = 3M\omega \quad (6)$$

donde M es el par o momento de las fuerzas F que provoca el viento sobre cada una de las palas, que son la de sustentación y la debida a transferencia de momento como se ha mostrado antes.

El momento puede calcularse mediante la ecuación

$$M = \int_0^L r dF \quad (7)$$

siendo r la distancia del centro del buje a cada punto de la pala y L la longitud total de cada pala.

Por último, la fuerza está dada por la suma de las ecuaciones (1) y (5):

$$F = F_{sus} + F_{con} = \left(\frac{1}{2} C_N + \alpha \sin(2\theta) \cos\theta \right) \rho A v^2 \quad (8)$$

Usando las ecuaciones (6), (7) y (8) y suponiendo por simplicidad que la pala es rectangular (de modo que $A = Lb$, donde b es la anchura de la pala) resulta para la potencia total

$$P_{rot} = \frac{3}{2} \rho C_N v^2 \omega \int_0^L r b dr = \frac{3}{2} \left(\frac{1}{2} C_N + \alpha \sin(2\theta) \cos\theta \right) \rho v^2 \omega b L^2 \quad (9)$$

donde ya sólo resta por tanto determinar los valores exactos de cada variable que aparece en esta expresión:

i) Para la densidad del aire ρ se puede tomar un valor estándar a nivel del mar de 1.225 Kg/m^3 .

ii) Para los coeficientes de sustentación C_N y de restitución α , a falta de especificaciones técnicas concretas, se puede tomar un valor óptimo igual a 1.

- iii) Para el ángulo de ataque tomaremos un valor estándar de 20° .
- iv) Para la velocidad angular ω y las dimensiones de la pala se deberán tener en cuenta las especificaciones técnicas del modelo concreto.
- v) El valor de la velocidad del viento se puede tomar como parámetro externo en función del cual determinar la potencia.

Cálculo de la potencia máxima disponible:

El resultado anterior puede compararse con la potencia máxima teórica que se podría llegar a obtener del viento, que es igual a la energía cinética del viento que atraviesa el rotor por unidad de tiempo y que está dada por

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \rho \pi L^2 v^3 \quad (10)$$

Teniendo en cuenta además la limitación impuesta por el resultado de Betz, que nos da un rendimiento máximo posible de $16/27$, se tiene:

$$P_{\max} = \frac{8}{27} \rho \pi L^2 v^3 \quad (11)$$

Aplicación al aerogenerador Bazán-Bonus 1.3 MW:

De acuerdo con las especificaciones técnicas de este modelo, se dispone de la siguiente información necesaria para la estimación de la potencia:

- Longitud de la pala: 29 m
- Cuerda en el extremo: 0.80 m
- Cuerda en la raíz: 2.40 m
- Radio del buje: 2 m²
- Velocidad del rotor: 19 / 13 r.p.m.

A partir de estos datos podemos estimar los parámetros que aparecen en la ecuación de la potencia y la potencia máxima:

- $b \approx 1.6$ m
- $\omega \approx 1.99 / 1.36$ rad/s
- $L = 15.5$ m

Comentarios: El valor de la anchura b de la pala se toma, de manera aproximada, como el promedio de los valores de cuerda en el extremo y la raíz. Para la velocidad angular (que es igual a la velocidad del rotor multiplicada por $2\pi/60$) se ha calculado un rango de valores que corresponde al rango de velocidades del rotor mencionado en las especificaciones. El valor de L se ha tomado como la mitad de la longitud de la pala más el radio del buje, suponiendo que en la mitad más alejada del buje la pala no recibe fuerza neta de rotación debido a su velocidad de rotación que es superior a la velocidad del viento.

Sustituyendo todos estos valores en las ecuaciones (9) y (11) se obtiene finalmente

$$P_{\text{rot}} \approx 3092v^2 / 2115v^2$$

$$P_{\max} \approx 1096v^2$$

donde nuevamente el intervalo mostrado para P_{rot} corresponde al intervalo de velocidades del rotor.

Para valores de la velocidad del viento entre 0 y 20 m/s se obtiene:

v (m/s)	P_{rot} (kW)	P_{max} (kW)
0	0	0
1	3,1	1,1
2	12,3	4,4
3	27,8	29,6
4	49,5	70,1
5	77,3	137,0
6	111,3	236,7
7	151,5	376,9
8	197,9	561,1
9	250,5	799,0
10	309,2	1096,0
11	374,1	1458,8
12	445,2	1893,9
13	522,5	2407,9
14	606,0	3007,4
15	695,7	3699,0
16	791,5	4489,2
17	893,6	5384,6
18	1001,8	6391,9
19	1116,2	7517,5
20	1236,8	8768,0

(En la potencia de rotación no está aplicado el límite de Betz, que corresponde a un factor de 16/27, equivalente a un 59%)

Interpretación y valoración de los resultados

En primer lugar hay valores de la potencia de rotación en la tabla que son mayores que la potencia máxima (para velocidades de viento pequeñas). Eso es porque en esos casos no sería posible tener el rotor girando a las revoluciones por minuto que marcan las especificaciones técnicas sólo con la fuerza del viento, y por tanto el cálculo de la potencia de rotación no es realista en esos casos concretos.

Por otro lado, usando los mejores valores posibles para α y C_x , la tabla anterior muestra que la potencia teórica es en la mayoría de casos inferior a la potencia real generada por el aerogenerador Bazán-Bonus, y suponiendo que tomáramos un coeficiente aerodinámico y un coeficiente de restitución algo más realistas posiblemente la potencia teórica estaría aún más por debajo de la real, lo cual aparentemente no tiene sentido. La razón se encuentra seguramente en que, tal y como justifican varios trabajos teóricos y experimentales en este campo, el aire que ejerce fuerza sobre las palas no es únicamente el que incide directamente sobre las mismas como hemos tenido en cuenta en el cálculo anterior sino que existe una zona de influencia mayor. Las partículas de aire que chocan

con la pala o son desviadas por la misma a su vez chocan y/o desvían a otras partículas de aire más alejadas que son por lo tanto también influenciadas. De todo esto resulta que pueda haber un aporte extra de energía del viento hacia la pala debido a estas partículas afectadas de forma "secundaria".

Esta idea, aunque físicamente coherente, no se puede cuantificar de forma sencilla mediante ninguna ley física establecida y se basa sólo en conjeturas y en resultados experimentales. En base a los experimentos conocidos es posible que el área de influencia del viento sobre la pala pueda ser 2 ó 3 veces mayor que el área misma de la pala, lo cual supondría que la potencia teórica mostrada en la tabla anterior también se multiplicaría por un factor 2 ó 3.

1.2. Bazán-Bonus (Bazán Turbinas)

Bazán Turbinas en su fábrica en Ferrol mecaniza gran parte de los componentes del aerogenerador y realiza el ensamblaje completo de la góndola. También lleva a cabo la instalación en el emplazamiento. Si el cliente así lo desea ofrece proyectos "llave en mano". Su actividad en este campo es reciente, apenas si data de 1996, trabajando sobre licencia del tecnólogo danés HONUS teniendo la exclusiva para fabricar y comercializar en España estos aerogeneradores, denominados Bazán-Bonus.

Actualmente fabrican los modelos Bazán-Bonus MK-IV de 600 kW de potencia unitaria y el modelo Bazán-Bonus de 1.300 kW, el primer aerogenerador de esta potencia instalado en España.

A la fecha tienen instaladas en España 184 máquinas MK-IV y una de 1.300 kW. En China acaban de instalar 20 máquinas de 600 kW.

AEROGENERADOR BAZÁN-BONUS 1,3 MW

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Rotor:

- Tipo: 3 palas, eje horizontal
- Posición: En contra del viento
- Diámetro: 62 m
- Área proyectada: 3.019 m²
- Velocidad del rotor: 19/13 r.p.m.
- Regulación de potencia: Combistall
- Inclinación del rotor: 5 grados

Pala:

- Tipo: Autoportante
- Longitud de la pala: 29 m
- Cuerda en el extremo: 0,80 m
- Cuerda de la raíz: 2,40 m
- Perfil aerodinámico: FFA3-NA-CA 632xx
- Concicidad: 0 grados
- Material: GRP
- Brillo superficial: Semimate, 5-15 ISO 2813

- Color superficial: Gris claro, Jonan 8091
- Denominación de la pala: LM 29
- Fabricante de la pala: LM Composites

Freno aerodinámico:

- Tipo: Actuación sistema de paso
- Activación: Activa, eléctrica "fail safe"

Componentes de transmisión de la carga:

- Bujes: Fundición nodular de hierro
- Cojinetes principales: Cojinetes de rodillos a rótula
- Eje de transmisión: Acero
- Placa de asiento de la góndola: Acero

Sistema de transmisión:

- Acoplamiento buje-eje: Bujes
- Acoplamiento Eje-multiplicador: Disco aplicado en caliente
- Multiplicador Planetario/helicoidal de 3 etapas
- Relación de multiplicación: 1:79
- Lubricación de la caja de engrajes: Par barboxeo
- Volumen de aceite: 185 l
- Enfriamiento multiplicador: Enfriador independiente
- Denominación multiplicador: PEAS 4375
- Fabricante del multiplicador: Flender AG
- Acoplamiento multiplicador-generador: Doble acoplamiento flexible

Freno mecánico:

- Tipo: Freno de disco "failsafe"
- Posición: Eje de alta velocidad
- Número de actuadores: 3

Generador:

- Tipo: Asíncrono
- Potencia nominal: 1,3/0,26 MW
- Velocidad sincrónica: 1.500/1.000 r.p.m.
- Tensión: 690 V
- Frecuencia: 50 Hz
- Protección: IP 54
- Refrigeración: Ventilador externo
- Clase de aislamiento: F
- Designación del generador: IEXR 500 LN 4/6
- Fabricante del generador: ABB

Góndola:

- Tipo: Totalmente cenada
- Material: Acero

Sistema de giro:

- Tipo: Activo
- Cojinete de giro: Corona dentada exteriormente
- Transmisión de giro: Cuatro motores eléctricos
- Freno del sistema de giro: Freno de fricción pasivo

Controlador:

- Tipo: Basado en microprocesador
- Control remoto: Preparado vía módem
- Designación del controlador: KK WTC-2.0
- Fabricante del controlador: KK Electronic A/S

Torre:

- Tipo: Torre tubular cónica
- Altura del buje: 50 - 68 m
- Protección anticorrosiva: Con pintura
- Brillo superficial: Semimate, 15-35 ISO2813
- Color superficial: Gris claro, Hempel 55210-01050

Datos de funcionamiento:

- Velocidad del viento a la entrada en servicio: 3 m/s
- Potencia nominal a: 15 m/s
- Velocidad del viento para la parada de emergencia: 25 m/s
- Máxima ráfaga de 3 s: 55 m/s (versión estándar)
- 60-80 m/s (vers. especiales)

Pesos (aproximadas):

- Rotor: 30.000 kg
- Góndola excl. rotor: 50.000 kg
- Torre de 68 m de altura de buje: 70.000 kg

CURVA DE POTENCIA PARA DENSIDAD DE AIRE DE 1,225 kg/m³

La curva de potencia es válida para las siguientes condiciones estándar del aire: temperatura ambiente 15°C, presión 1.013

Tabla I

Viento (m/s)	Potencia (kW)	Viento (m/s)	Potencia (kW)
0,0	0,0	13,0	1.193,1
1,0	0,0	14,0	1.250,1
2,0	0,0	15,0	1.281,7
3,0	0,0	16,0	1.296,0
4,0	32,1	17,0	1.298,2
5,0	91,6	18,0	1.299,5
6,0	172,5	19,0	1.299,8
7,0	291,2	20,0	1.300,0
8,0	439,3	21,0	1.300,0
9,0	604,3	22,0	1.300,0
10,0	779,6	23,0	1.300,0
11,0	923,7	24,0	1.300,0
12,0	1.072,2	25,0	1.300,0

Tabla II

Viento (m/s)	Potencia (kW)	Viento (m/s)	Potencia (kW)
5,0	1.545	8,0	4.330
5,5	1.992	8,5	4.758
6,0	2.494	9,0	5.170
6,5	2.927	9,5	5.554
7,0	3.408	10,0	5.908
7,5	3.870		

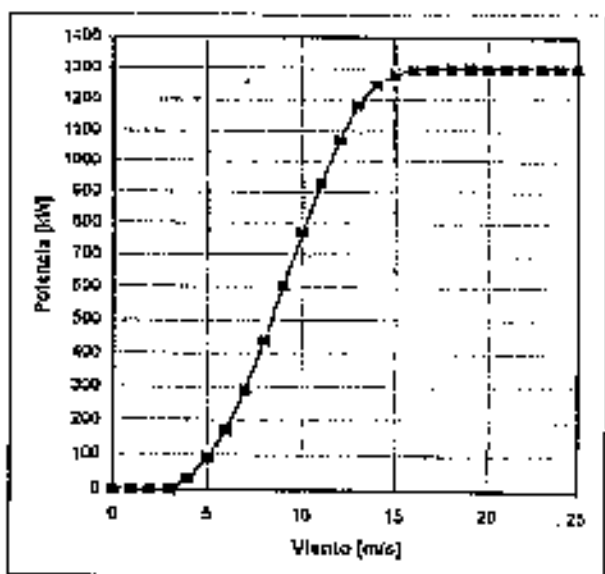
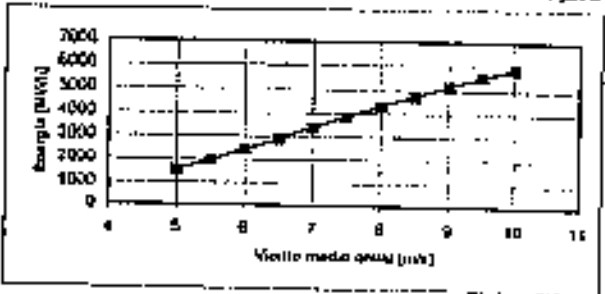


Figura 1

Figura 2



aire y densidad del aire de $1,225 \text{ kg/m}^3$, para el rotor limpio y flujo de aire horizontal no perturbado. (Tabla I, Fig. 1)

Los datos de producción de

energía anual para las distintas velocidades medias de viento a la altura del buje se calculan a partir de la curva de potencia anterior suponiendo una distribución de *Raleigh* de velocidad

de viento, una disponibilidad del 100%, no habiéndose considerado ni pérdidas en la red ni otros factores que pudiesen afectar a la producción. (Tabla II, Fig. 2)